

Общая физика

**Лектор: к. ф.-м. н., доцент
Веретельник Владимир Иванович**

Электрический ток в металлах

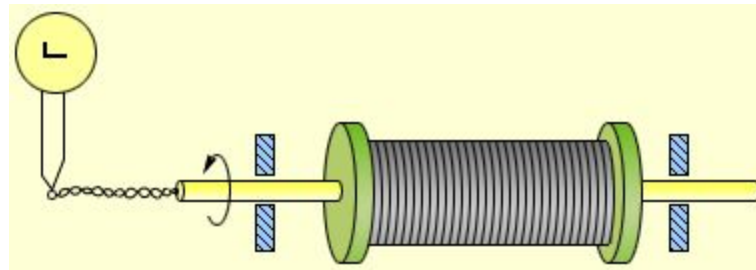
- 1. Опыт Толмена-Стьюарта.**
- 2. Классическая теория проводимости металлов - Теория Друде-Лоренца.**
- 3. Закон Ома и закон Джоуля- Ленца из классической теории электропроводности.**
- 4. Сверхпроводимость.**
- 5. Электронно-дырочный переход. Транзисторы.**

Электрический ток в металлах

- Электрический ток в металлах – это упорядоченное движение электронов под действием электрического поля.
- Наиболее убедительное доказательство электронной природы тока в металлах было получено в опытах с инерцией электронов (**Опыт Толмена и Стьюарта**).
- Катушка с большим числом витков тонкой проволоки приводилась в быстрое вращение вокруг своей оси.
- Концы катушки с помощью гибких проводов были присоединены к чувствительному баллистическому гальванометру.

Электрический ток в металлах

- **Раскрученная катушка резко тормозилась, и в цепи возникал кратковременный ток, обусловленный инерцией носителей заряда.**
- **Полный заряд, протекающий по цепи, измерялся по отбросу стрелки гальванометра.**



Электрический ток в металлах

- При торможении вращающейся катушки на каждый носитель заряда e действует тормозящая сила, которая

$$F = -m \frac{dv}{dt},$$

- играет роль сторонней силы, то есть силы неэлектрического происхождения.
- Сторонняя сила, отнесенная к единице заряда, по определению является напряженностью $E_{\text{ст}}$ поля сторонних сил:

$$E_{\text{ст}} = - \frac{m}{e} \frac{dv}{dt}.$$

- Следовательно, в цепи при торможении катушки возникает электродвижущая сила:

$$\mathcal{E} = E_{\text{ст}} l = - \frac{m}{e} \frac{dv}{dt} l,$$

Электрический ток в металлах

- где l – длина проволоки катушки. За время торможения катушки по цепи протечет заряд q , равный:

$$q = \int Idt = \frac{1}{R} \int \Sigma dt = \frac{m v_0}{e R}$$

- Здесь I – мгновенное значение силы тока в катушке, R – полное сопротивление цепи, v_0 – начальная линейная скорость проволоки.
- Отсюда удельный заряд e / m свободных носителей тока в металлах равен:

$$\frac{e}{m} = \frac{v_0}{Rq}$$

- По современным данным модуль заряда электрона (*элементарный заряд*) равен $e = 1,60218 \cdot 10^{-19}$ Кл,

Электрический ток в металлах

- Удельный заряд

$$\frac{e}{m} = 1,75882 \cdot 10^{11} \text{ Кл / кг}$$

- Хорошая электропроводность металлов объясняется высокой концентрацией свободных электронов, равной по порядку величины числу атомов в единице объема.
- Предположение о том, что за электрический ток в металлах ответственны электроны, возникло значительно раньше опытов Толмена и Стюарта.
- Еще в 1900 году немецкий ученый П. Друде на основе гипотезы о существовании свободных электронов в металлах создал электронную теорию проводимости металлов.

Электрический ток в металлах

- Эта теория получила развитие в работах голландского физика Х. Лоренца и носит название *классической электронной теории*.
- Согласно этой теории, электроны в металлах ведут себя как электронный газ, во многом похожий на идеальный газ.
- Электронный газ заполняет пространство между ионами, образующими кристаллическую решетку металла
- Из-за взаимодействия с ионами электроны могут покинуть металл, лишь преодолев так называемый *потенциальный барьер*.
- Высота этого барьера называется *работой выхода*.
- При обычных (комнатных) температурах у электронов не хватает энергии для преодоления потенциального барьера.

Электрический ток в металлах

- Согласно теории Друде–Лоренца, электроны обладают такой же средней энергией теплового движения, как и молекулы одноатомного идеального газа.
- Это позволяет оценить среднюю скорость теплового движения электронов по формулам молекулярно-кинетической теории.
- При комнатной температуре она оказывается примерно равной 10^5 м/с.

Электрический ток в металлах

- При наложении внешнего электрического поля в металлическом проводнике кроме теплового движения электронов возникает их упорядоченное движение (дрейф), то есть электрический ток.

Электрический ток в металлах

- **Оценка величины дрейфовой скорости показывает, что для металлического проводника сечением 1 мм^2 , по которому течет ток 10 А , эта величина лежит в пределах $0,6\text{--}6 \text{ мм/с}$.**
- **Таким образом, средняя скорость упорядоченного движения электронов в металлических проводниках на много порядков меньше средней скорости их теплового движения.**

Электрический ток в металлах

- **Малая скорость дрейфа на противоречит опытному факту, что ток во всей цепи постоянного тока устанавливается практически мгновенно.**
- **Замыкание цепи вызывает распространение электрического поля со скоростью $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.**
- **Через время порядка l/c (l – длина цепи) вдоль цепи устанавливается стационарное распределение электрического поля и в ней начинается упорядоченное движение электронов.**

Электрический ток в металлах

- В классической электронной теории металлов предполагается, что движение электронов подчиняется законам механики Ньютона.
- В этой теории пренебрегают взаимодействием электронов между собой, а их взаимодействие с положительными ионами сводят только к соударениям.
- Предполагается также, что при каждом соударении электрон передает решетке всю накопленную в электрическом поле энергию и поэтому после соударения он начинает движение с нулевой дрейфовой скоростью.

Электрический ток в металлах

- Несмотря на то, что все эти допущения являются весьма приближенными, классическая электронная теория качественно объясняет законы электрического тока в металлических проводниках.
- **Закон Ома.** В промежутке между соударениями на электрон действует сила, равная по модулю eE , в результате чего он приобретает ускорение

$$\frac{eE}{m}$$

- Поэтому к концу свободного пробега дрейфовая скорость электрона равна

$$v_{\text{д}} = (v_{\text{д}})_{\text{max}} = \frac{eE}{m} \tau,$$

Электрический ток в металлах

- где τ – время свободного пробега, которое для упрощения расчетов предполагается одинаковым для всех электронов.
- Среднее значение скорости дрейфа равно половине максимального значения:

$$\bar{v}_d = \frac{1}{2} (v_d)_{\max} = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \tau.$$

Электрический ток в металлах

- Рассмотрим проводник длины l и сечением S с концентрацией электронов n .
- Ток в проводнике может быть записан в виде:

$$I = enS\bar{v}_d = \frac{1}{2} \frac{e^2 n S}{m} E = \frac{e^2 n S}{2ml} U,$$

- где $U = El$ – напряжение на концах проводника.
- Полученная формула выражает закон Ома для металлического проводника.
- Электрическое сопротивление проводника равно:

$$R = \frac{2m l}{e^2 n \tau S},$$

Электрический ток в металлах

- Удельное сопротивление ρ и удельная проводимость σ выражаются соотношениями:

$$\rho = \frac{2m}{e^2 n \tau}; \quad \sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{e^2 n \tau}{2m}$$

- Закон Джоуля–Ленца. К концу свободного пробега электроны приобретают под действием поля кинетическую энергию

$$\frac{1}{2} m (v_{\text{Д}})_{\text{max}}^2 = \frac{1}{2} \frac{e^2 \tau^2}{m} E^2$$

Электрический ток в металлах

- Согласно сделанным предположениям, вся эта энергия передается решетке при соударении и переходит в тепло.
- За время Δt каждый электрон испытывает $\Delta t / \tau$ соударений.
- В проводнике сечением S и длины l имеется nSl электронов.
- Отсюда следует, что выделяемое в проводнике за время Δt тепло равно:

Электрический ток в металлах

$$\Delta Q = \frac{nSl\Delta t}{\tau} \frac{e^2 \tau^2}{2m} E^2 = \frac{ne^2 \tau S}{2m l} U^2 \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t$$

- Это соотношение выражает **закон Джоуля–Ленца**.
- Таким образом, классическая электронная теория объясняет существование электрического сопротивления металлов, законы Ома и Джоуля–Ленца.
- Однако в ряде вопросов классическая электронная теория приводит к выводам, находящимся в противоречии с опытом.

Электрический ток в металлах

- Эта теория не может, например, объяснить, почему молярная теплоемкость металлов, также как и молярная теплоемкость диэлектрических кристаллов, равна $3R$, где R – универсальная газовая постоянная (закон Дюлонга и Пти.)
- Классическая электронная теория не может также объяснить температурную зависимость удельного сопротивления металлов.
- Теория дает $\rho \sim \sqrt{T}$, в то время как из эксперимента получается зависимость $\rho \sim T$.
- Однако наиболее ярким примером расхождения теории и опытов является **сверхпроводимость**.

Электрический ток в металлах

- При некоторой определенной температуре $T_{кр}$, различной для разных веществ, удельное сопротивление скачком уменьшается до нуля. Критическая температура у ртути равна 4,1 К, у алюминия 1,2 К, у олова 3,7 К.
- Сверхпроводимость наблюдается не только у элементов, но и у многих химических соединений и сплавов.

Электрический ток в металлах

- Например, соединение ниобия с оловом (Ni_3Sn) имеет критическую температуру 18 К.
- Некоторые вещества, переходящие при низких температурах в сверхпроводящее состояние, не являются проводниками при обычных температурах.
- В то же время такие «хорошие» проводники, как медь и серебро, не становятся сверхпроводниками при низких температурах.

Электрический ток в металлах

- **Вещества в сверхпроводящем состоянии обладают исключительными свойствами. Практически наиболее важным их них является способность длительное время (многие годы) поддерживать без затухания электрический ток, возбужденный в сверхпроводящей цепи.**

Электрический ток в металлах

- **Классическая электронная теория не способна объяснить явление сверхпроводимости. Объяснение механизма этого явления было дано только через 60 лет после его открытия на основе квантово-механических представлений.**
- **Научный интерес к сверхпроводимости возрастал по мере открытия новых материалов с более высокими критическими температурами.**

Электрический ток в металлах

- Значительный шаг в этом направлении произошел в 1986 году, когда было обнаружено, что у одного сложного керамического соединения $T_{кр} = 35 \text{ K}$.
- Уже в следующем 1987 году физики сумели создать новую керамику с критической температурой 98 K, превышающей температуру жидкого азота (77 K).
- Явление перехода веществ в сверхпроводящее состояние при температурах, превышающих температуру кипения жидкого азота, было названо **высокотемпературной сверхпроводимостью**.
- В 1988 году было создано керамическое соединение на основе элементов $Tl-Ca-Ba-Cu-O$ с критической температурой 125 K.
- Следует отметить, что до настоящего времени механизм высокотемпературной сверхпроводимости керамических материалов до конца не выяснен.

Электрический ток в полупроводниках

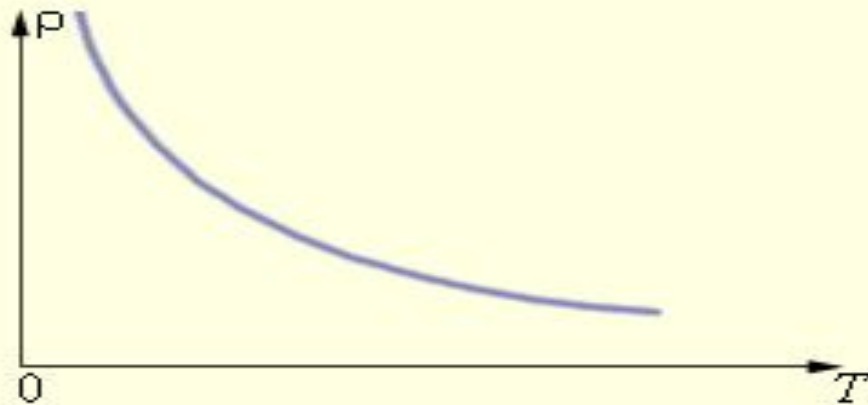
- 1. Качественное отличие полупроводников от металлов.**
- 2. Электронно-дырочный механизм проводимости чистых беспримесных полупроводников.**
- 3. Электронная и дырочная проводимость примесных полупроводников. Донорные и акцепторные примеси.**
- 4. Электронно-дырочный переход. Полупроводниковый диод. Транзистор.**

Электрический ток в полупроводниках

- К числу полупроводников относятся многие химические элементы (германий, кремний, селен, теллур, мышьяк и др.), огромное количество сплавов и химических соединений.
- Почти все неорганические вещества окружающего нас мира – полупроводники.
- Самым распространенным в природе полупроводником является кремний, составляющий около 30 % земной коры.

Электрический ток в полупроводниках

- **Качественное отличие полупроводников от металлов проявляется прежде всего в зависимости удельного сопротивления от температуры.**



Электрический ток в полупроводниках

- Такой ход зависимости $\rho(T)$ показывает, что у полупроводников концентрация носителей свободного заряда не остается постоянной, а увеличивается с ростом температуры.
- Рассмотрим качественно этот механизм на примере германия (Ge).
- В кристалле кремния (Si) механизм аналогичен.

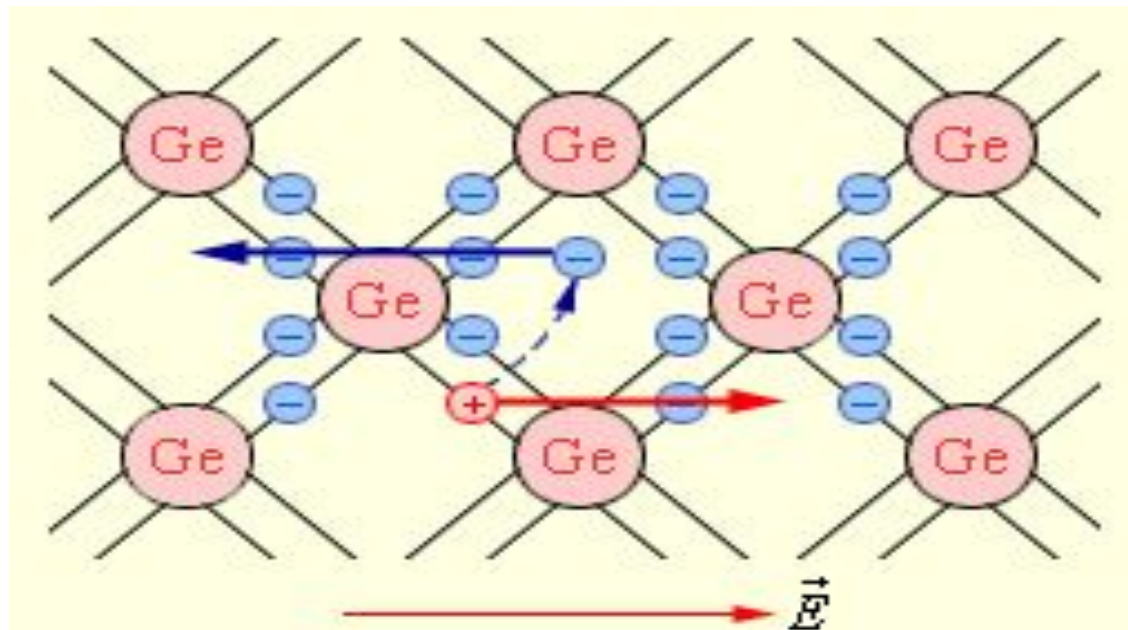
Электрический ток в полупроводниках

- Атомы германия имеют четыре слабо связанных электрона на внешней оболочке.
- Их называют *валентными электронами*.
- В кристаллической решетке каждый атом окружен четырьмя ближайшими соседями.
- Связь между атомами в кристалле германия является *ковалентной*, т. е. осуществляется парами валентных электронов.
- Каждый валентный электрон принадлежит двум атомам.

Электрический ток в полупроводниках

- Валентные электроны в кристалле германия гораздо сильнее связаны с атомами, чем в металлах.
- Поэтому концентрация электронов проводимости при комнатной температуре в полупроводниках на много порядков меньше, чем у металлов.
- Вблизи абсолютного нуля температуры в кристалле германия все электроны заняты в образовании связей.
- Такой кристалл электрического тока не проводит.

Электрический ток в полупроводниках



- Парно-электронные связи в кристалле германия и образование электронно-дырочной пары.

Электрический ток в полупроводниках

- При повышении температуры некоторая часть валентных электронов может получить энергию, достаточную для разрыва ковалентных связей.
- Тогда в кристалле возникнут свободные электроны (электроны проводимости).
- Одновременно в местах разрыва связей образуются вакансии, которые не заняты электронами.
- Эти вакансии получили название **«дырок»**.

Электрический ток в полупроводниках

- **Вакантное место может быть занято валентным электроном** из соседней пары, тогда **дырка** переместится на новое место в кристалле.
- **Если полупроводник помещается в электрическое поле, то в упорядоченное движение вовлекаются не только свободные электроны, но и дырки, которые ведут себя как положительно заряженные частицы.**

Электрический ток в полупроводниках

- Поэтому ток I в полупроводнике складывается из электронного I_n и дырочного I_p токов: $I = I_n + I_p$.
- Электронно-дырочный механизм проводимости проявляется только у чистых (т. е. без примесей) полупроводников. Он называется *собственной электрической проводимостью* полупроводников.

Электрический ток в полупроводниках

- **При наличии примесей** электропроводимость полупроводников сильно изменяется.
- Например, добавка примесей фосфора в кристалл кремния в количестве 0,001 атомного процента уменьшает удельное сопротивление более чем на пять порядков.
- Такое сильное влияние примесей может быть объяснено на основе изложенных выше представлений о строении полупроводников.

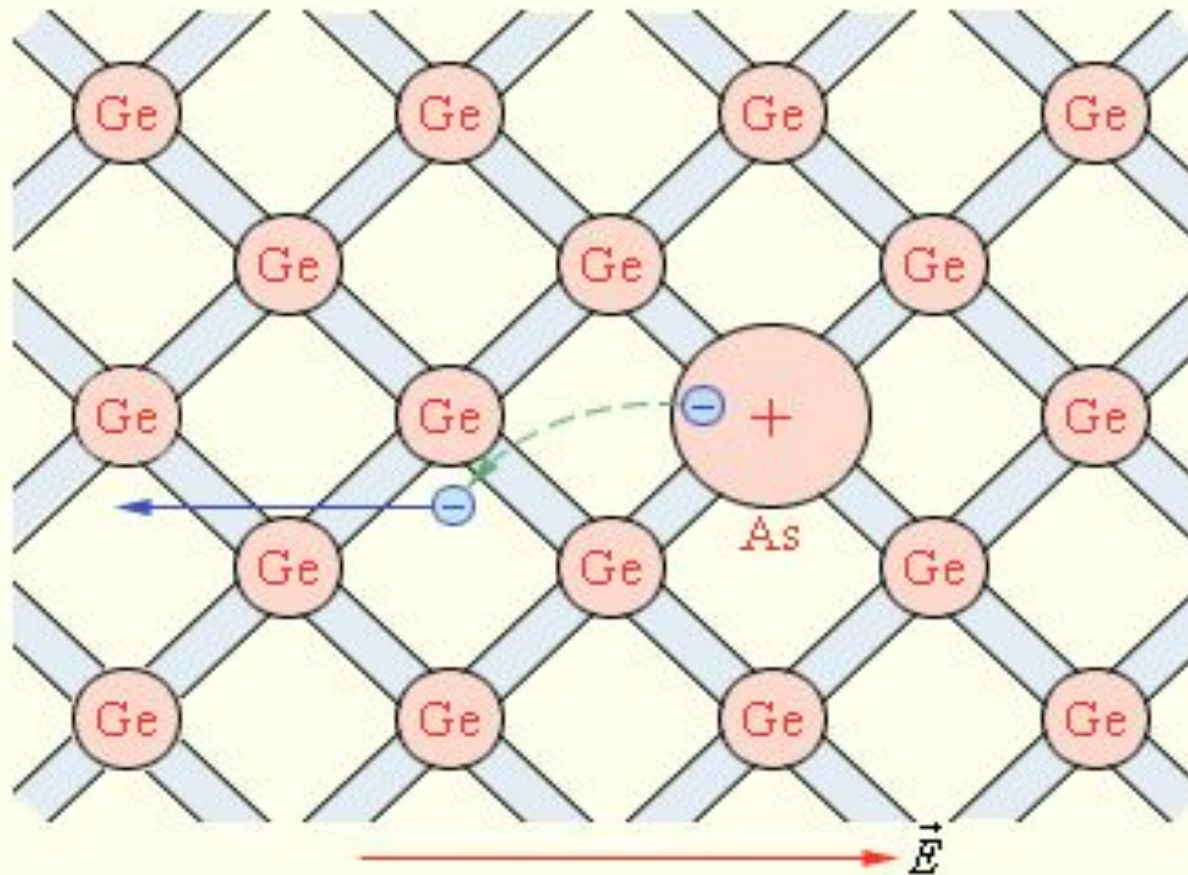
Электрический ток в полупроводниках

- **Необходимым условием резкого уменьшения удельного сопротивления полупроводника при введении примесей является отличие валентности атомов примеси от валентности основных атомов кристалла.**
- **Проводимость полупроводников при наличии примесей называется *примесной проводимостью*.**

Электрический ток в полупроводниках

- Различают два типа примесной проводимости – **электронную** и **дырочную проводимости**.
- *Электронная проводимость* возникает, когда в кристалл германия с четырехвалентными атомами введены пятивалентные атомы (например, атомы мышьяка, As).

Электрический ток в полупроводниках



Электрический ток в полупроводниках

- **Четыре валентных электрона атома мышьяка включены в образование ковалентных связей с четырьмя соседними атомами германия.**
- **Пятый валентный электрон оказался излишним.**
- **Он легко отрывается от атома мышьяка и становится свободным.**
- **Атом, потерявший электрон, превращается в положительный ион, расположенный в узле кристаллической решетки.**

Электрический ток в полупроводниках

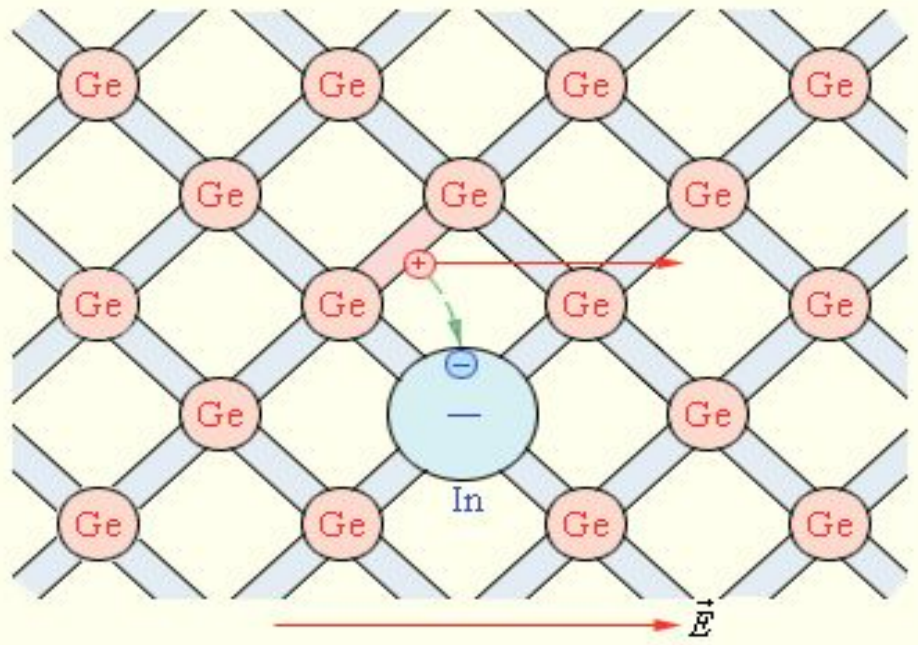
- Примесь из атомов с валентностью, превышающей валентность основных атомов полупроводникового кристалла, называется *донорской примесью*.
- В результате ее введения в кристалле появляется значительное число свободных электронов.
- Это приводит к резкому уменьшению удельного сопротивления полупроводника – в тысячи и даже миллионы раз.
- Удельное сопротивление проводника с большим содержанием примесей может приближаться к удельному сопротивлению металлического проводника.

Электрический ток в полупроводниках

- Такая проводимость, обусловленная свободными электронами, называется **электронной**, а полупроводник, обладающий электронной проводимостью, называется ***полупроводником n-типа***.

Электрический ток в полупроводниках

- **Дырочная проводимость** возникает, когда в кристалл германия введены трехвалентные атомы (например, атомы индия, In).



Электрический ток в полупроводниках

- На рис. показан атом индия, который создал с помощью своих валентных электронов ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами германия.
- На образование связи с четвертым атомом германия у атома индия нет электрона.
- Этот недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из ковалентной связи соседних атомов германия.
- В этом случае атом индия превращается в отрицательный ион, расположенный в узле кристаллической решетки, а в ковалентной связи соседних атомов образуется вакансия.

Электрический ток в полупроводниках

- Примесь атомов, способных захватывать электроны, называется **акцепторной примесью**.
- В результате введения акцепторной примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются вакантные места (дырки).
- В результате введения акцепторной примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются вакантные места (дырки).
- На эти места могут перескакивать электроны из соседних ковалентных связей, что приводит к хаотическому блужданию дырок по кристаллу.

Электрический ток в полупроводниках

- Концентрация дырок в полупроводнике с акцепторной примесью значительно превышает концентрацию электронов, которые возникли из-за механизма собственной электропроводности полупроводника: $n_p \gg n_n$.
- Проводимость такого типа называется **дырочной проводимостью**.
- Примесный полупроводник с дырочной проводимостью называется **полупроводником *p*-типа**.
- Основными носителями свободного заряда в полупроводниках *p*-типа являются дырки.

Электрический ток в полупроводниках

- Следует подчеркнуть, что дырочная проводимость в действительности обусловлена эстафетным перемещением по вакансиям от одного атома германия к другому электронов, которые осуществляют ковалентную связь.
- Для полупроводников *n*- и *p*-типов закон Ома выполняется в определенных интервалах сил тока и напряжений при условии постоянства концентраций свободных носителей.

Электронно-дырочный переход. Транзистор

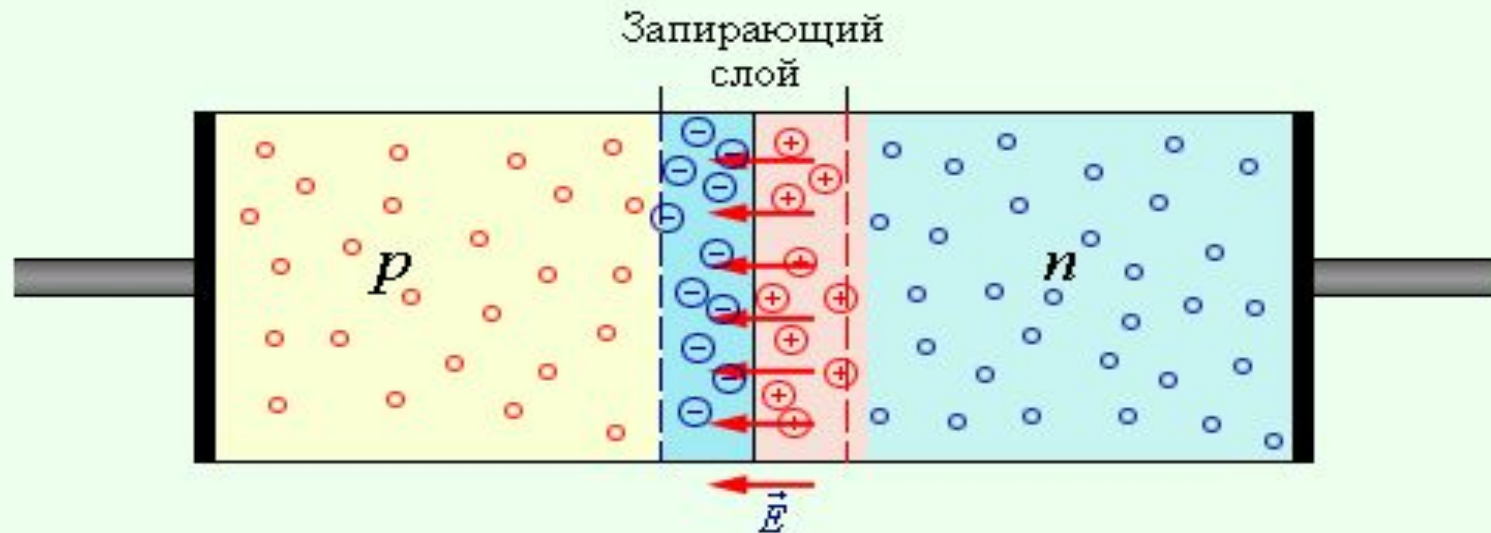
- В современной электронной технике полупроводниковые приборы играют исключительную роль.
- За последние три десятилетия они почти полностью вытеснили электровакуумные приборы.
- В любом полупроводниковом приборе имеется один или несколько электронно-дырочных переходов.
- **Электронно-дырочный переход** (или *n–p*-переход) – это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости.

Электронно-дырочный переход. Транзистор

- При контакте двух полупроводников n - и p -типов начинается процесс диффузии: дырки из p -области переходят в n -область, а электроны, наоборот, из n -области в p -область.
- В результате в n -области вблизи зоны контакта уменьшается концентрация электронов и возникает положительно заряженный слой.
- В p -области уменьшается концентрация дырок и возникает отрицательно заряженный слой.

Электронно-дырочный переход. Транзистор

- Таким образом, на границе полупроводников образуется двойной электрический слой, электрическое поле которого препятствует процессу диффузии электронов и дырок навстречу друг другу



Электронно-дырочный переход. Транзистор

- ***n–p*-переход обладает удивительным свойством односторонней проводимости.**
- **Если полупроводник с *n–p*-переходом подключен к источнику тока так, что положительный полюс источника соединен с *n*-областью, а отрицательный – с *p*-областью, то напряженность поля в запирающем слое возрастает.**

Электронно-дырочный переход. Транзистор

- Дырки в p -области и электроны в n -области будут смещаться от n - p -перехода, увеличивая тем самым концентрации неосновных носителей в запирающем слое.
- Ток через n - p -переход практически не идет.
- Напряжение, поданное на n - p -переход в этом случае называют **обратным**.

Электронно-дырочный переход. Транзистор

- **Весьма незначительный обратный ток обусловлен только собственной проводимостью полупроводниковых материалов, т. е. наличием небольшой концентрации свободных электронов в p -области и дырок в n -области.**

Электронно-дырочный переход. Транзистор

- Если n – p -переход соединить с источником так, чтобы положительный полюс источника был соединен с p -областью, а отрицательный с n -областью, то напряженность электрического поля в запирающем слое будет уменьшаться, что облегчает переход основных носителей через контактный слой.

Электронно-дырочный переход. Транзистор

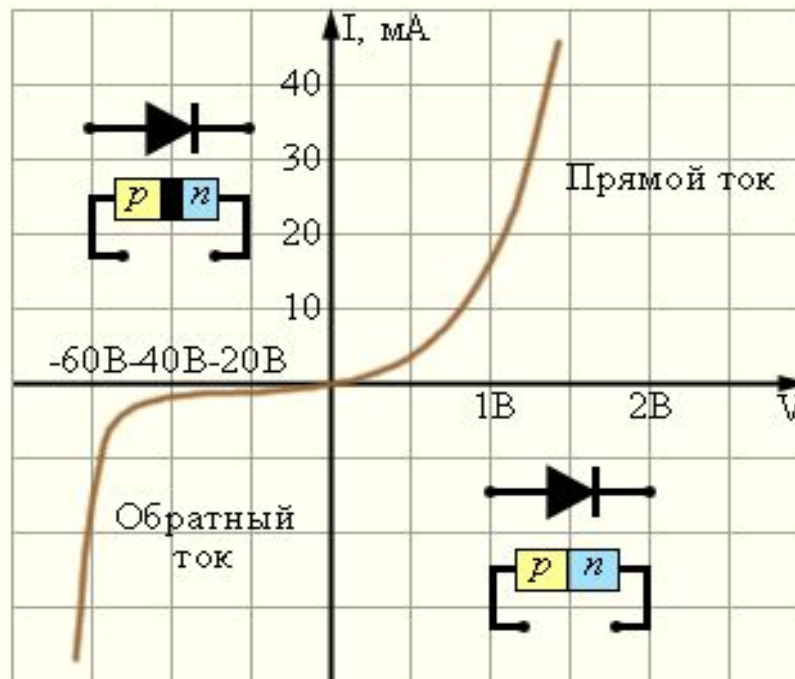
- Дырки из p -области и электроны из n -области, двигаясь навстречу друг другу, будут пересекать n – p -переход, создавая ток в прямом направлении.
- Сила тока через n – p -переход в этом случае будет возрастать при увеличении напряжения источника.

Электронно-дырочный переход. Транзистор

- Способность n – p -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в приборах, которые называются *полупроводниковыми диодами*. Полупроводниковые диоды изготавливаются из кристаллов кремния или германия.
- При их изготовлении в кристалл с каким-либо типом проводимости вплавляют примесь, обеспечивающую другой тип проводимости.

Электронно-дырочный переход. Транзистор

- Типичная вольт-амперная характеристика кремниевого диода



Электронно-дырочный переход. Транзистор

- Полупроводниковые приборы не с одним, а с двумя n – p -переходами называются *транзисторами*.
- Транзисторы бывают двух типов: p – n – p -транзисторы и n – p – n -транзисторы.

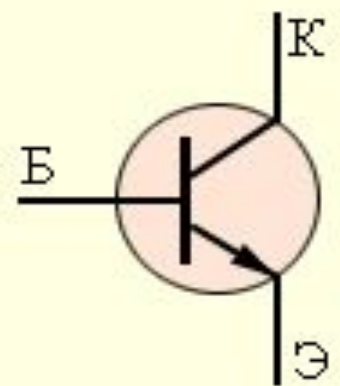
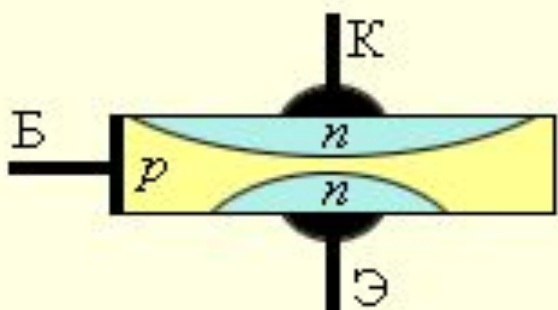
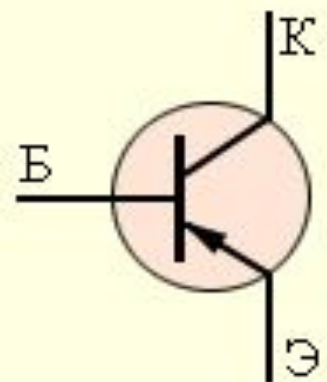
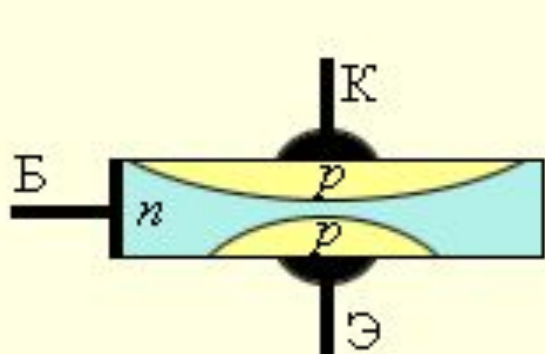
Электронно-дырочный переход. Транзистор

- Например, германиевый транзистор $p-n-p$ -типа представляет собой небольшую пластинку из германия с донорной примесью, т. е. из полупроводника n -типа.
- В этой пластинке создаются две области с акцепторной примесью, т. е. области с дырочной проводимостью.

Электронно-дырочный переход. Транзистор

- В транзисторе n - p - n -типа основная германиевая пластинка обладает проводимостью p -типа, а созданные на ней две области – проводимостью n -типа.
- Пластинку транзистора называют *базой (Б)*, одну из областей с противоположным типом проводимости – *коллектором (К)*, а вторую – *эмиттером (Э)*.

Электронно-дырочный переход. Транзистор



Электрический ток в электролитах

- 1. Электролиты. Носители зарядов в электролитах.**
- 2. Электролиз. Электролитическая диссоциация.**
- 3. Закон Фарадея для электролиза.**
- 4. Объединенный закон Фарадея для электролиза.**

Электрический ток в электролитах

- **Электролитами** принято называть проводящие среды, в которых протекание электрического тока сопровождается переносом вещества.
- Носителями свободных зарядов в электролитах являются положительно и отрицательно заряженные ионы.

Электрический ток в электролитах

- Основными представителями электролитов, широко используемыми в технике, являются водные растворы неорганических кислот, солей и оснований.
- Прохождение электрического тока через электролит сопровождается выделением веществ на электродах.
- Это явление получило название *электролиза*.

Электрический ток в электролитах

- Электрический ток в электролитах представляет собой перемещение ионов обоих знаков в противоположных направлениях.
- Положительные ионы движутся к отрицательному электроду (*катоду*), отрицательные ионы – к положительному электроду (*аноду*).
- Ионы обоих знаков появляются в водных растворах солей, кислот и щелочей в результате расщепления части нейтральных молекул.
- Это явление называется *электролитической диссоциацией*.

Электрический ток в электролитах

- Например, хлорид меди CuCl_2 диссоциирует в водном растворе на ионы меди и хлора:
- При подключении электродов к источнику тока ионы под действием электрического поля начинают упорядоченное движение:
$$\text{CuCl}_2 \rightleftharpoons \text{Cu}^{++} + 2\text{Cl}^-$$
- положительные ионы меди движутся к катоду, а отрицательно заряженные ионы хлора – к аноду.

Электрический ток в электролитах

- Достигнув катода, ионы меди нейтрализуются избыточными электронами катода и превращаются в нейтральные атомы, оседающие на катоде.
- Ионы хлора, достигнув анода, отдают по одному электрону.
- После этого нейтральные атомы хлора соединяются попарно и образуют молекулы хлора Cl_2 .
- Хлор выделяется на аноде в виде пузырьков.

Электрический ток в электролитах

- Закон электролиза был экспериментально установлен английским физиком М. Фарадеем в 1833 году.
- *Закон Фарадея* определяет количества первичных продуктов, выделяющихся на электродах при электролизе:
- **Масса m вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна заряду Q , прошедшему через электролит:**
- $m = kQ = kIt$.
- Величину k называют **электрохимическим эквивалентом**.

Электрический ток в электролитах

- Масса выделившегося на электроде вещества равна массе всех ионов, пришедших к электроду:

$$m = m_0 N = m_0 \frac{Q}{q_0} = \frac{m_0}{q_0} It.$$

- Здесь m_0 и q_0 – масса и заряд одного иона, $N = \frac{Q}{q_0}$ – число ионов, пришедших к электроду при прохождении через электролит заряда Q .
- Таким образом, электрохимический эквивалент k равен отношению массы m_0 иона данного вещества к его заряду q_0 .

Электрический ток в электролитах

- Так как заряд иона равен произведению валентности вещества n на элементарный заряд e ($q_0 = n_e$), то выражение для электрохимического эквивалента k можно записать в виде :

$$k = \frac{m_0}{q_0} = \frac{m_0 N_A}{neN_A} = \frac{1}{F} \frac{M}{n}$$

- $F = eN_A$ – *постоянная Фарадея.*
- $F = eN_A = 96485$ Кл / моль.

Электрический ток в электролитах

- **Постоянная Фарадея численно равна заряду, который необходимо пропустить через электролит для выделения на электроде одного моля одновалентного вещества.**
- **Закон Фарадея для электролиза приобретает вид:**

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} It.$$

Контрольные вопросы

- 1. Носители зарядов в металлах.**
- 2. Краткие сведения о классической теории проводимости металлов (теория Друде-Лоренца).**
- 3. Закон Ома из классической теории (краткий вывод).**
- 4. Закон Джоуля-Ленца из классической теории проводимости (краткий вывод).**
- 5. Какие физические проблемы не может объяснить классическая теория проводимости металлов.**
- 6. Краткие сведения о сверхпроводимости.**

Контрольные вопросы

1. **Электроны и дырки. Как они образуются в чистых полупроводниках?**
2. **Механизм проводимости чистых полупроводников.**
3. **Донорные и акцепторные полупроводники.**
4. **Механизм проводимости примесных полупроводников.**
5. **Как осуществить электронную и дырочную проводимость в полупроводниках.**
6. **Что представляет электронно-дырочный переход?**
7. **Объясните, почему электронно-дырочный переход может выпрямлять переменный ток.**
8. **Транзистор.**

Контрольные вопросы

- 1. Какие носители зарядов есть в электролитах?**
- 2. Что такое электролиты? Что такое электролитическая диссоциация?**
- 3. Закон Фарадея для электролиза.**
- 4. Объединенный закон электролиза Фарадея.**